

# ねじれ振り子型重力波検出器 TOBA(Phase-III)の開発(45) : ねじれ振り子と読み取り光学系の開発

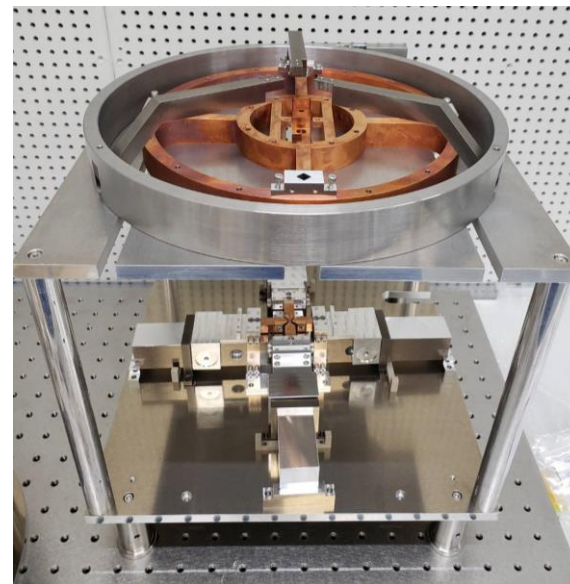
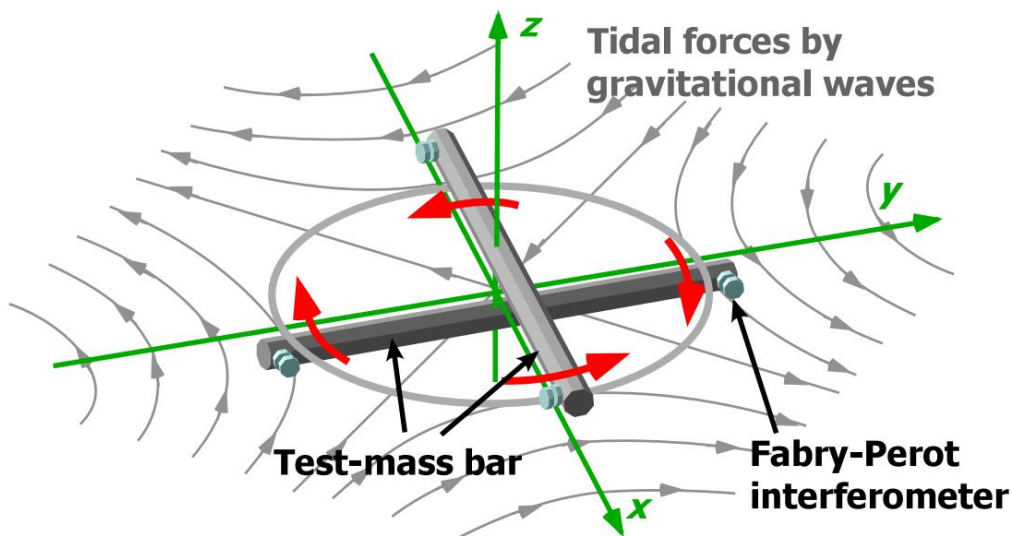
---

大島 由佳<sup>A</sup>, 高野 哲<sup>A</sup>, Ching Pin Ooi<sup>A</sup>,  
Mengdi Cao<sup>B</sup>, Perry W. F. Forsyth<sup>A</sup>,  
道村 唯太<sup>C, D</sup>, 小森 健太郎<sup>D</sup>, 安東 正樹<sup>A, D</sup>

東大理<sup>A</sup>, 北京師範大天文<sup>B</sup>,  
カリフォルニア工科大学<sup>C</sup>, 東大ビッグバン<sup>D</sup>

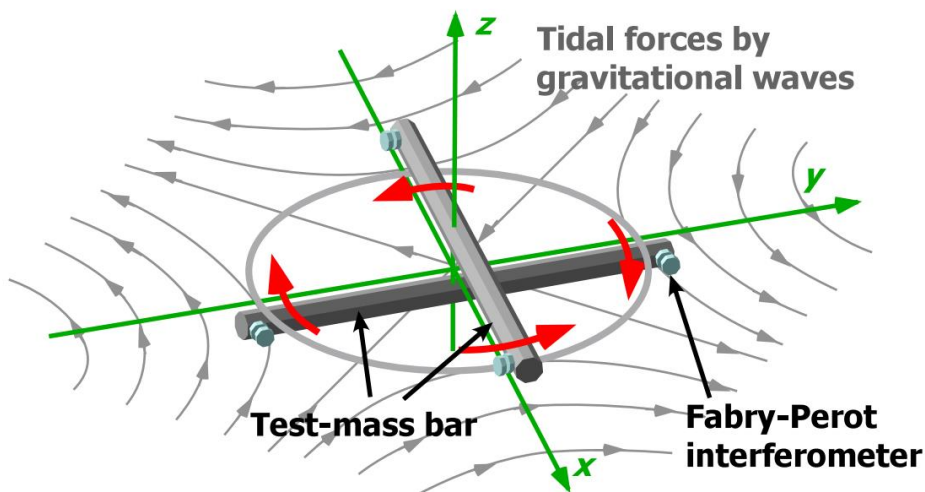
# 概要

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ Phase-III TOBA を開発中
  - ねじれ振り子の冷却試験は完了
  - 感度を追求する段階
- 過去のプロトタイプで得られた知見をもとに 懸架系と読み取り光学系の製作を進めている

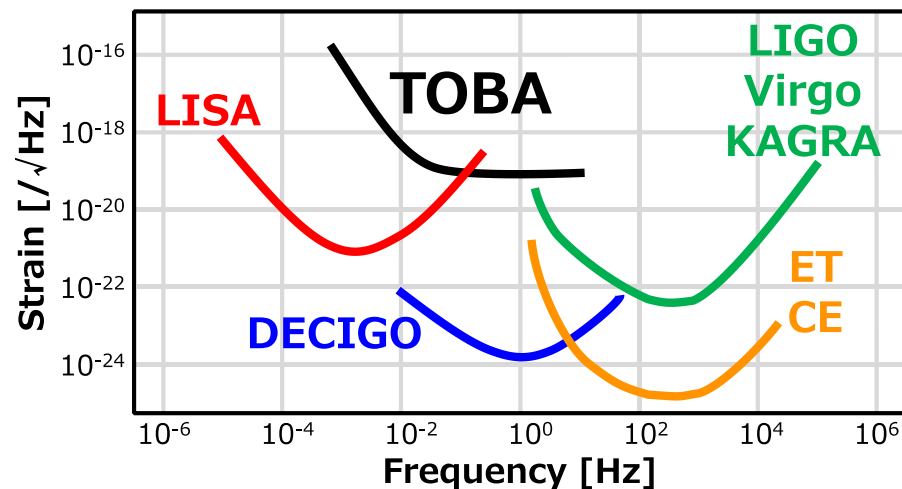


# ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA

- TOBA: TOrsion-Bar Antenna
- 水平に懸架した2本の棒状マスで潮汐力によるねじれ回転を検出
- ねじれ振り子の共振周波数は低い ( $\sim 1$  mHz)
  - 地上で低周波数に高感度
- 宇宙打ち上げの技術開発・コストが抑えられる
- 地上にあるためメンテナンスが簡単



[M. Ando+ \(2010\)](#)

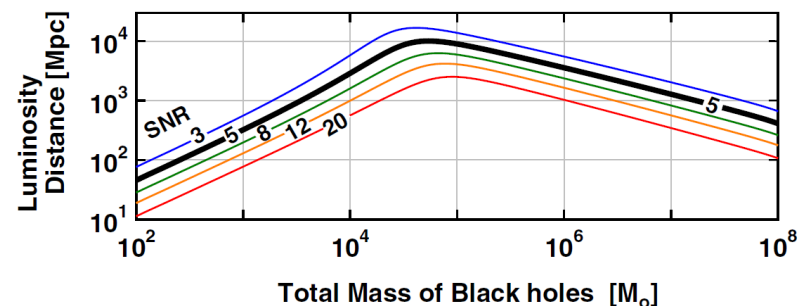


# TOBA で得られるサイエンス (1)

## 低周波の重力波観測

- 中間質量ブラックホール連星合体
    - $\sim 1$  Mpc 以内 (銀河系内) (Phase-III)
    - $\sim 10$  Gpc 以内 (宇宙全体) (Final)
- 大質量ブラックホール形成過程の解明

- 背景重力波
    - $\Omega_{\text{GW}} \sim 10^{-7}$  @ 0.1 Hz (Final)
- 初期宇宙の直接探査

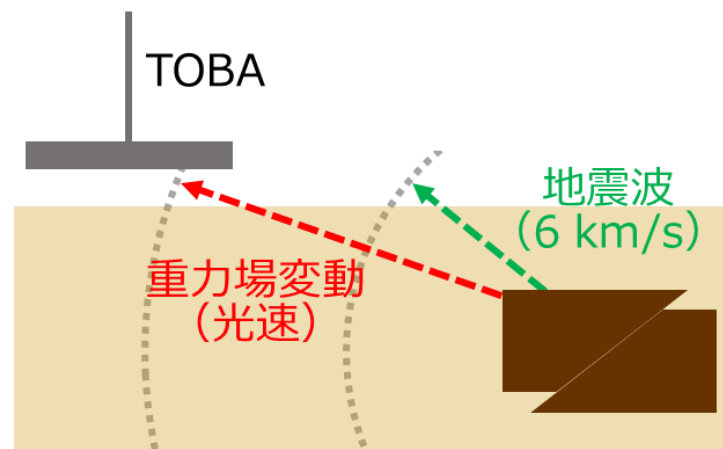
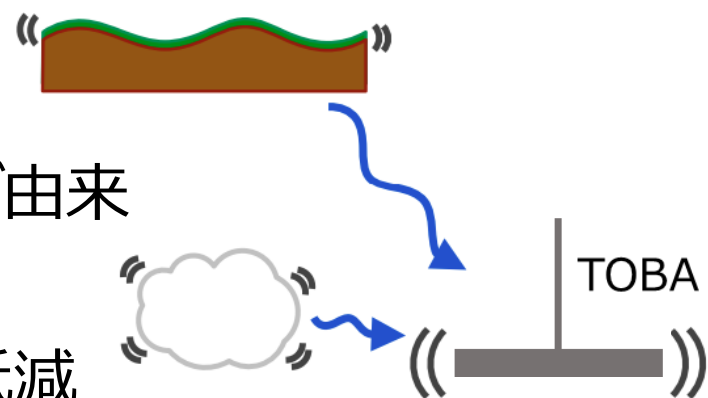


[M. Ando+ \(2010\)](#)

# TOBA で得られるサイエンス (2)

## 地球物理の観測

- 重力勾配雑音: 大気や地面の揺らぎ由来
  - 初の直接検出 (Phase-III)  
→ 第3世代重力波望遠鏡の雑音低減
- より早い地震速報
  - 100 km 先の M6 の地震を早期検出 (Phase-III)  
→ 災害被害の軽減



# TOBA 開発の流れ・目標感度

Phase-I

Phase-II

現在

Phase-III

Final

原理実証

要素開発・雑音低減  
地球物理の観測

重力波観測

$10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$   
(達成)

$10^{-15} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$   
(目標)

$10^{-19} / \sqrt{\text{Hz}} @ 0.1 \text{ Hz}$   
(目標)

20 cm テストマス

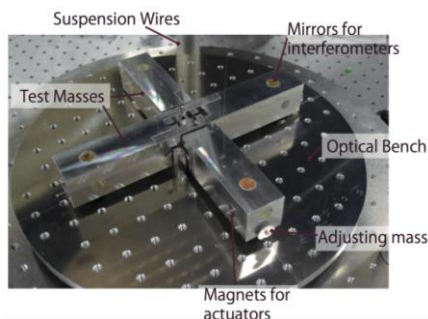
35 cm テストマス

10 m テストマス

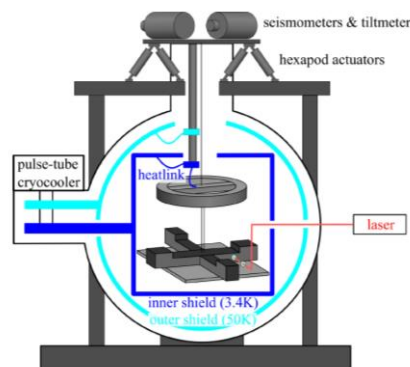
常温

低温 (4 K)

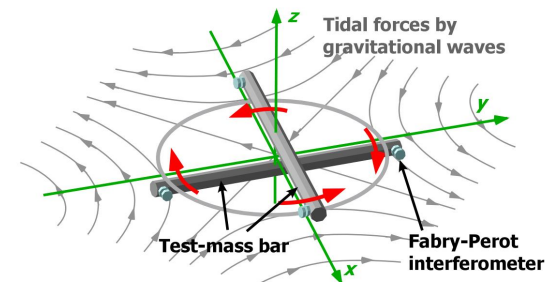
低温 (4 K)



[K. Ishidoshiro+ \(2011\)](#)  
[A. Shoda+ \(2017\)](#)



[T. Shimoda+ \(2020\)](#)

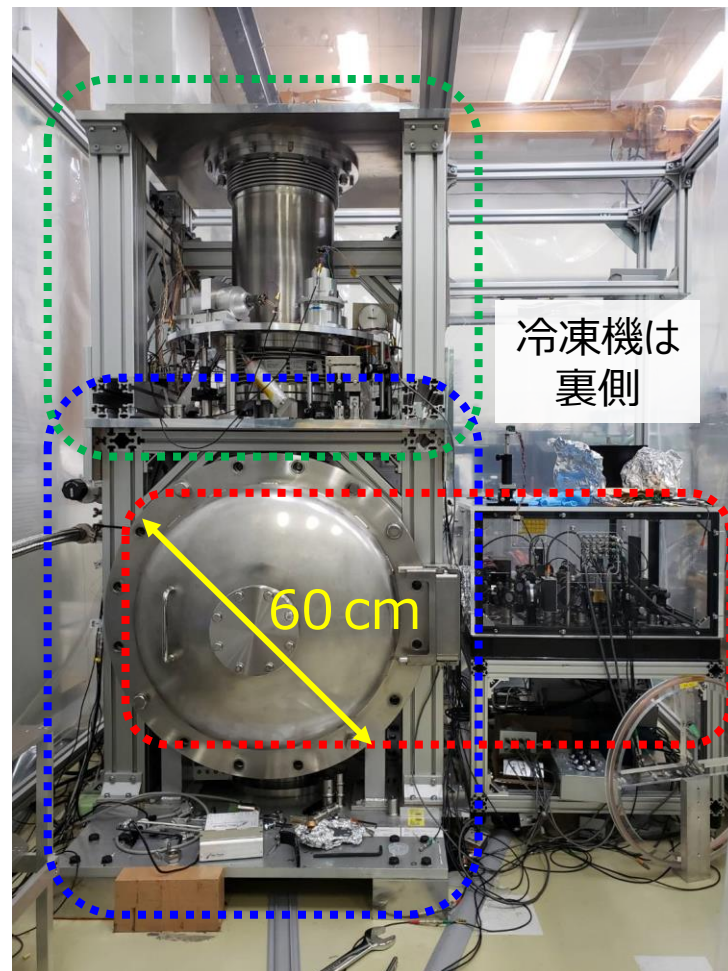
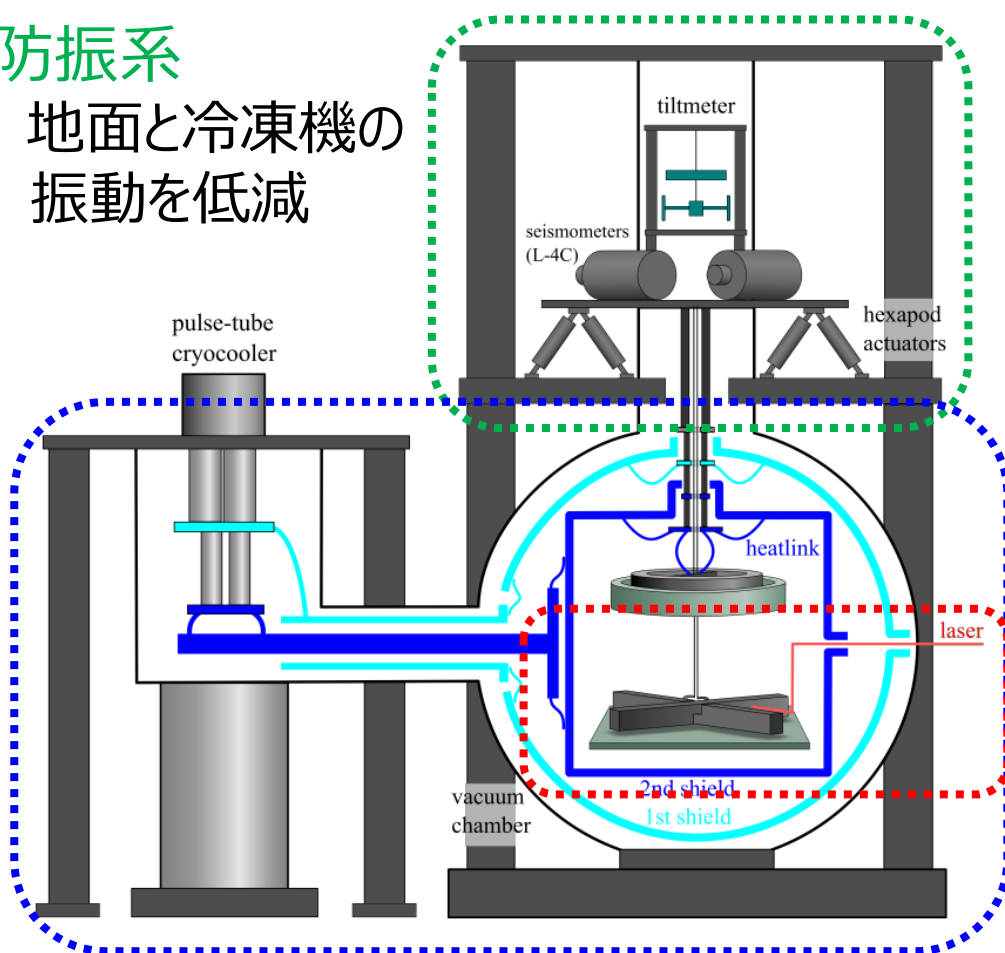


# Phase-III TOBAの構成

下田智文 博士論文 (2019)

## 防振系

地面と冷凍機の振動を低減



冷凍機は裏側

60 cm

@東大 本郷キャンパス

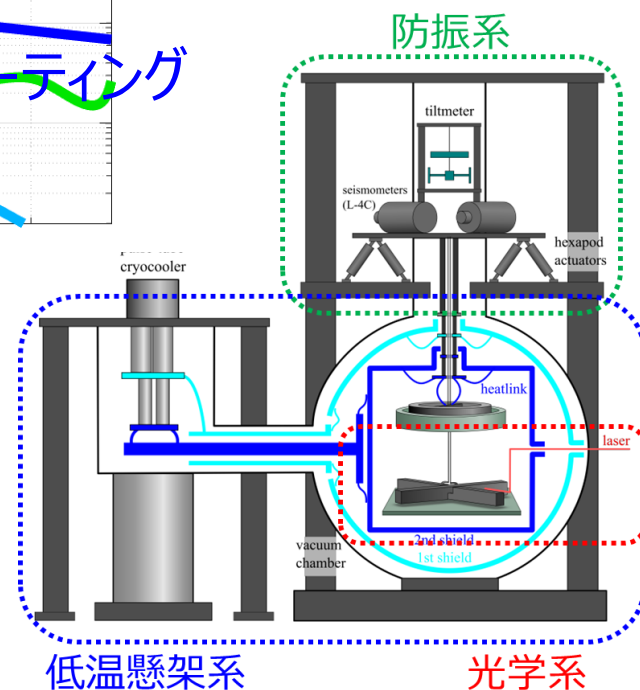
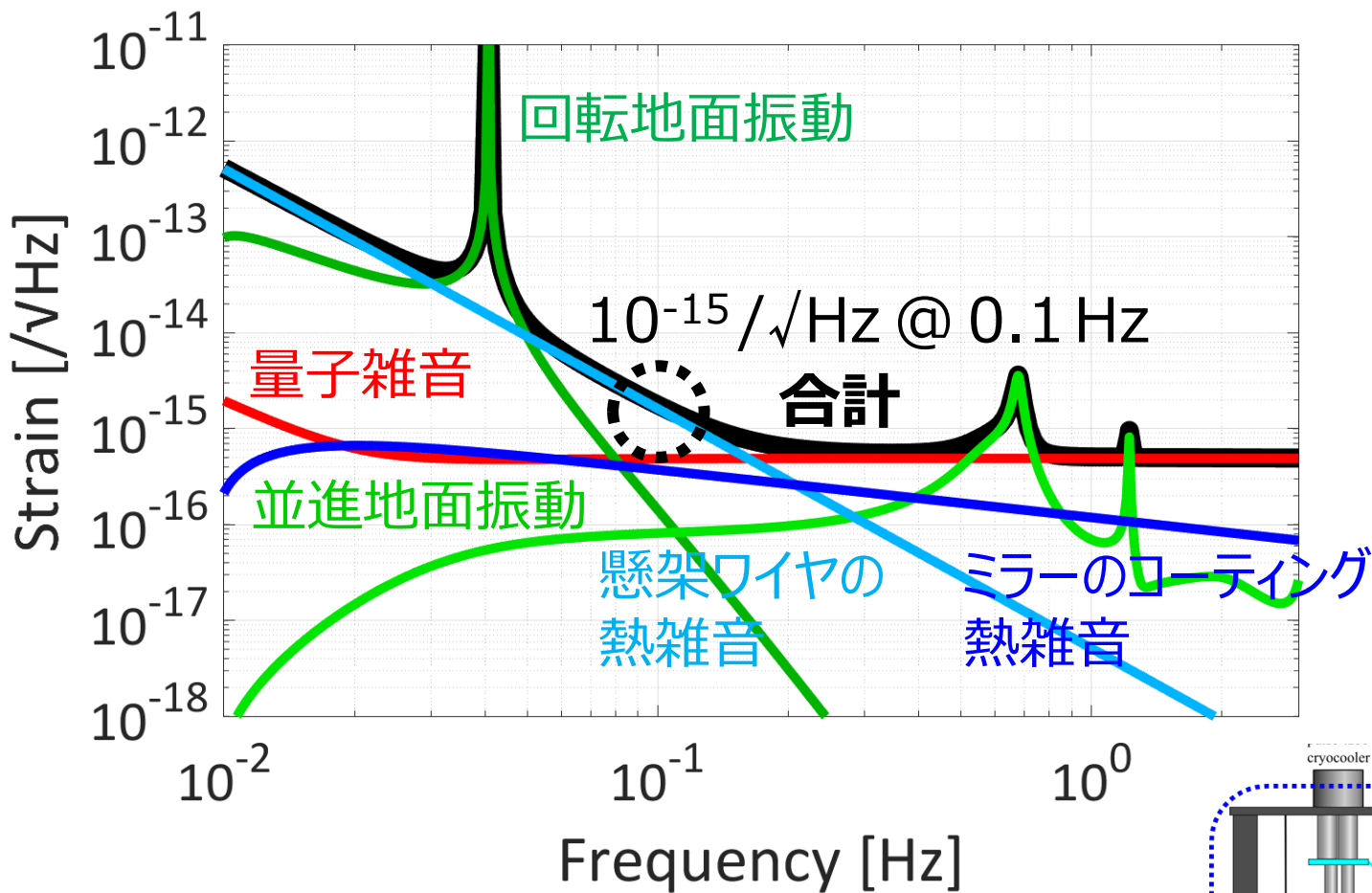
## 低温懸架系

冷却されたねじれ振り子

## 光学系

ねじれ振り子の回転を読み取る

# Phase-III TOBA の目標感度

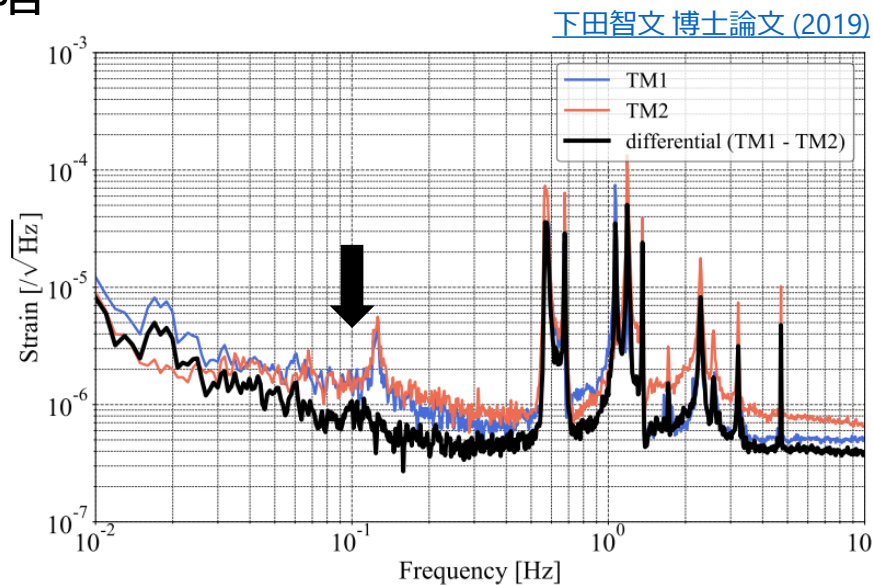
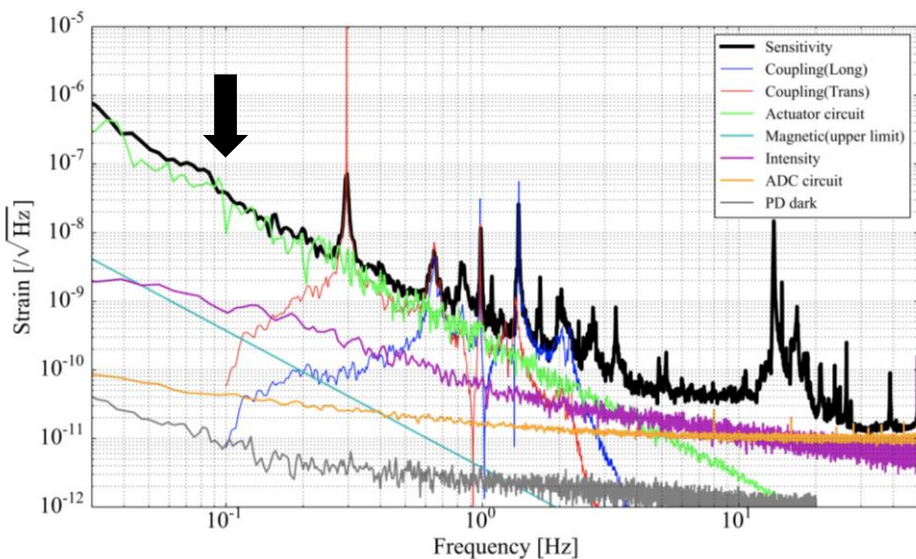




# Phase-III TOBA の現状

- 常温での達成感度:  $4 \times 10^{-8} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - カウンターウェイトによるテストマスの傾き調整
  - 読み取り光学系はマイケルソン干渉計
  - アクチュエータ雑音・並進地面振動からのカップリング雑音で感度が制限
- 低温での達成感度:  $7 \times 10^{-7} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - 6 K までの冷却に成功
  - 読み取り光学系は光てこ
  - ビームジッター雑音で感度が制限

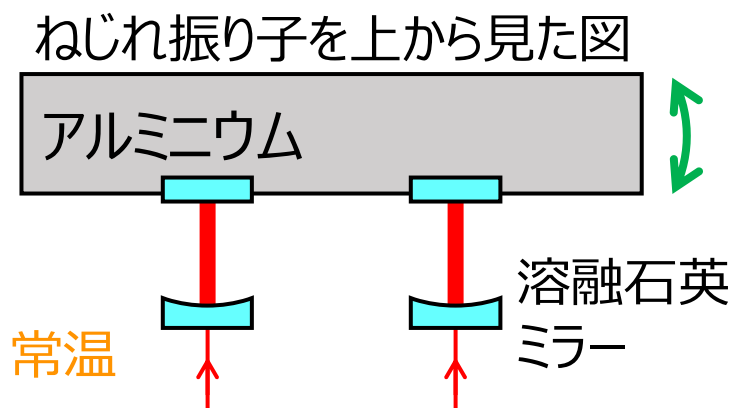
→ 構成を改良し感度を追求する段階



# 実験の目的・構成

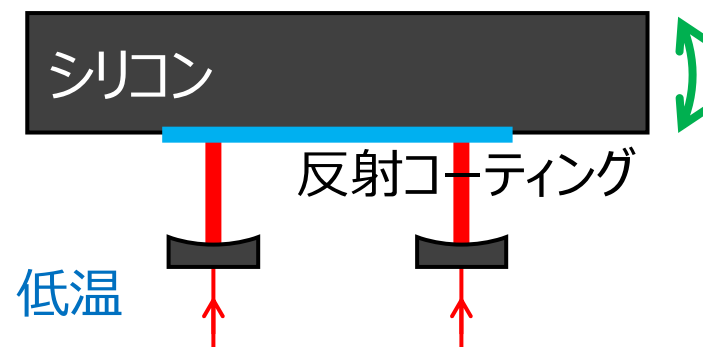
- 目的
  - ・ 差動ファブリペロー共振器での角度読み取りの実証
  - ・ シリコン製のねじれ振り子の製作
  - ・ 現在の状況で可能な最高感度を出す

## 第1段階



- ・ 設計の問題点の洗い出し
- ・ 共振器ロックの実証

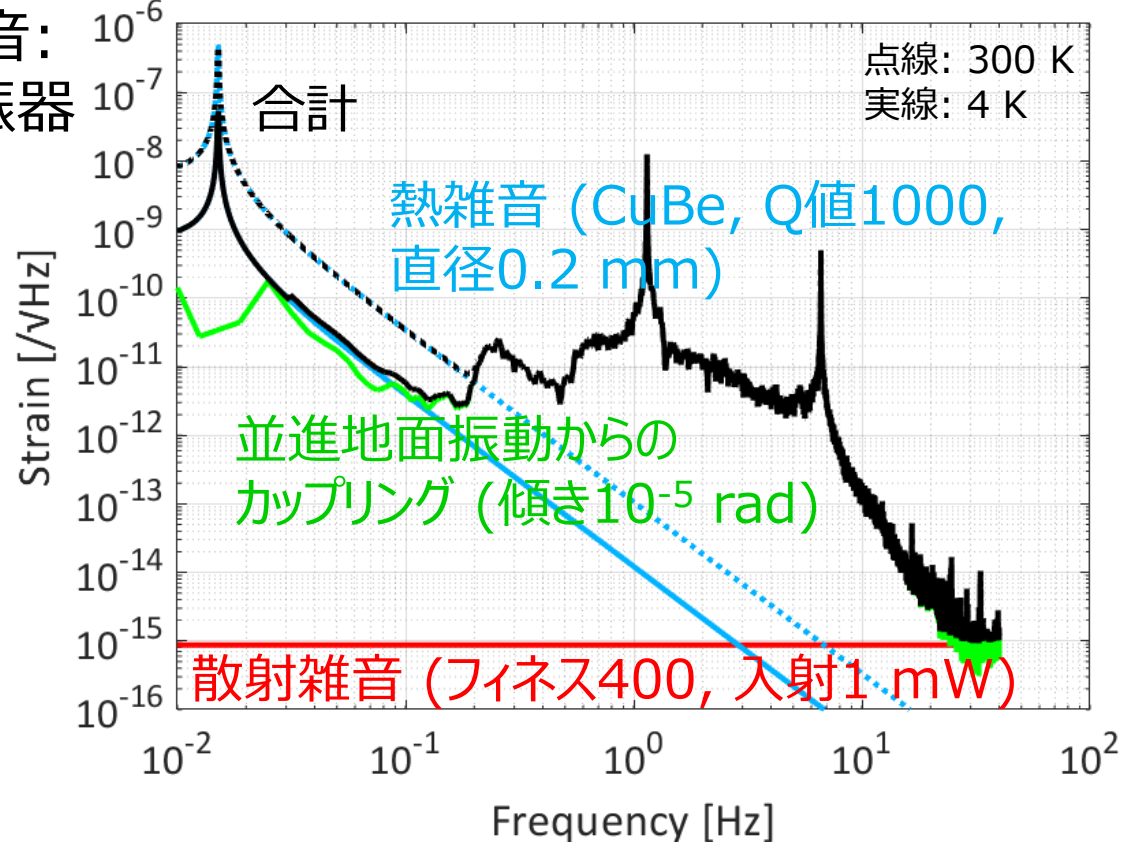
## 第2段階



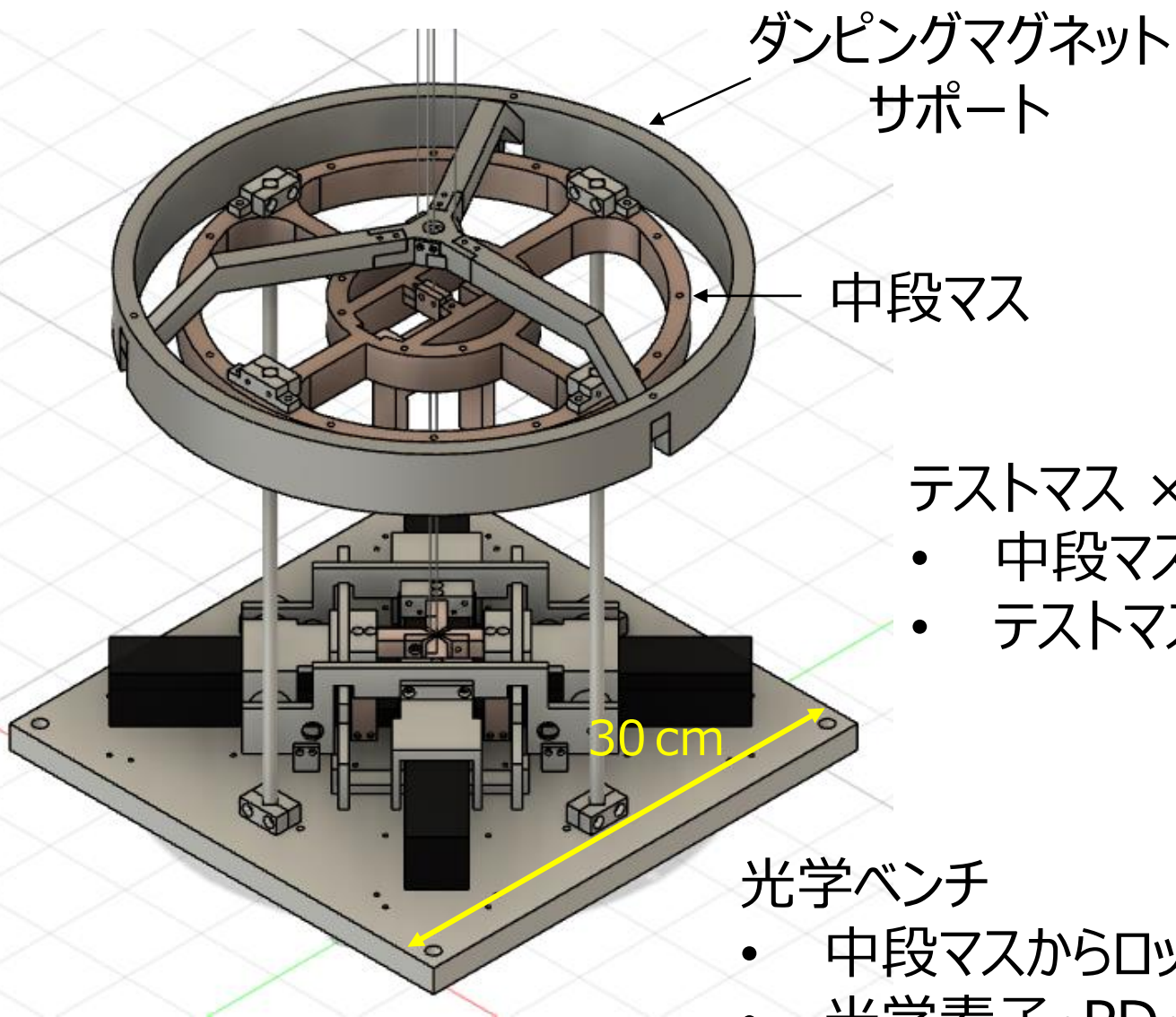
- ・ 目標感度の達成

# 目標感度・要求値

- 目標感度:  $6 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$  @ 0.1 Hz
  - 懸架ワイヤの熱雑音で制限される・常温→低温での感度向上
- 要求値
  - ねじれの共振周波数  $< 0.1$  Hz: テストマス・懸架ワイヤの設計
  - 並進地面振動からのカップリング雑音  $<$  熱雑音: テストマス傾き
  - 散射雑音  $<$  熱雑音:  
ファブリペロー共振器



# 懸架系の設計



テストマス ×2

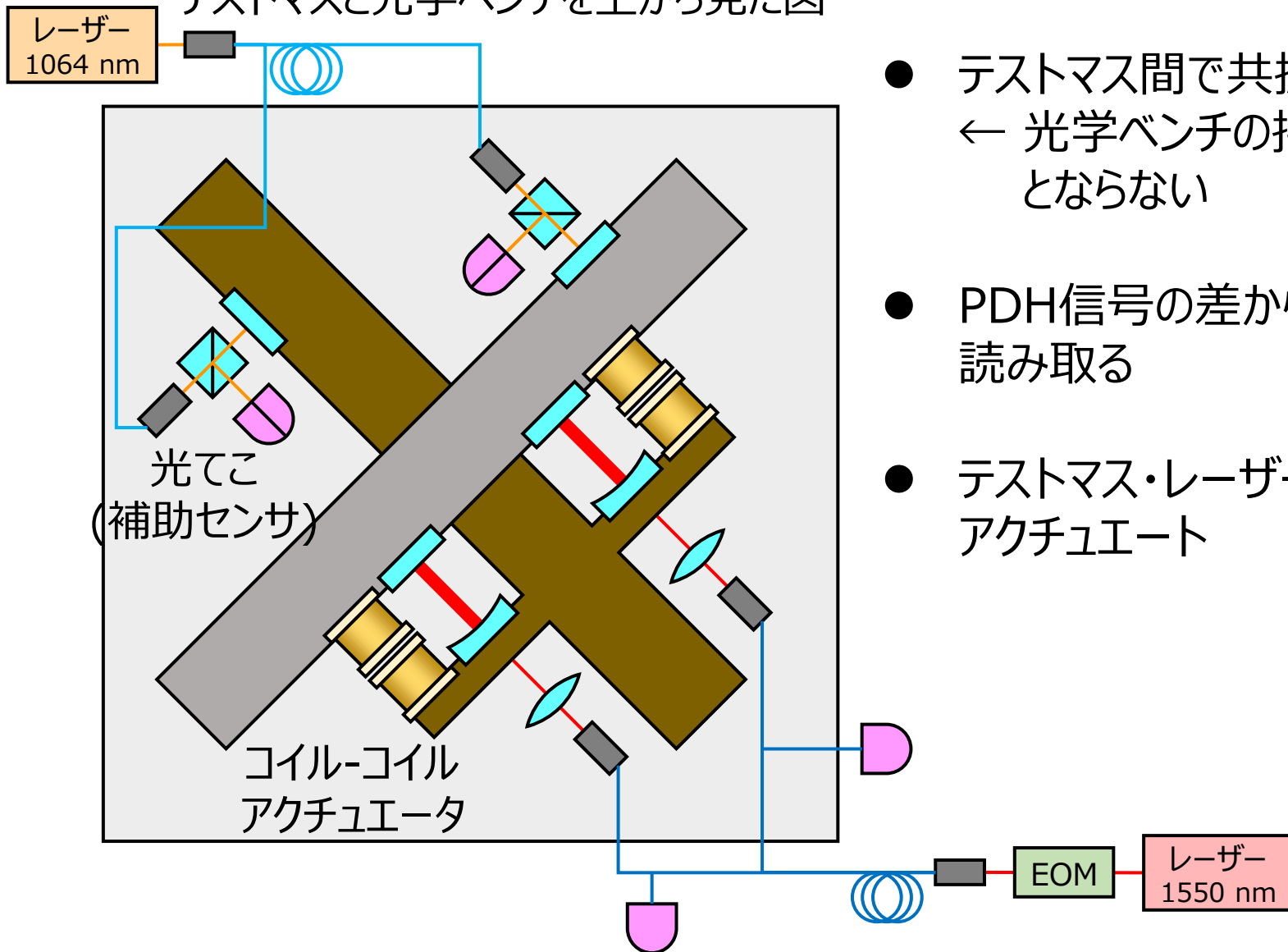
- 中段マスから1本吊り
- テストマス間で共振器を構築

光学ベンチ

- 中段マスからロッドで4本吊り
- 光学素子・PD・コイルなどを設置

# 光学系の設計

テストマスと光学ベンチを上から見た図

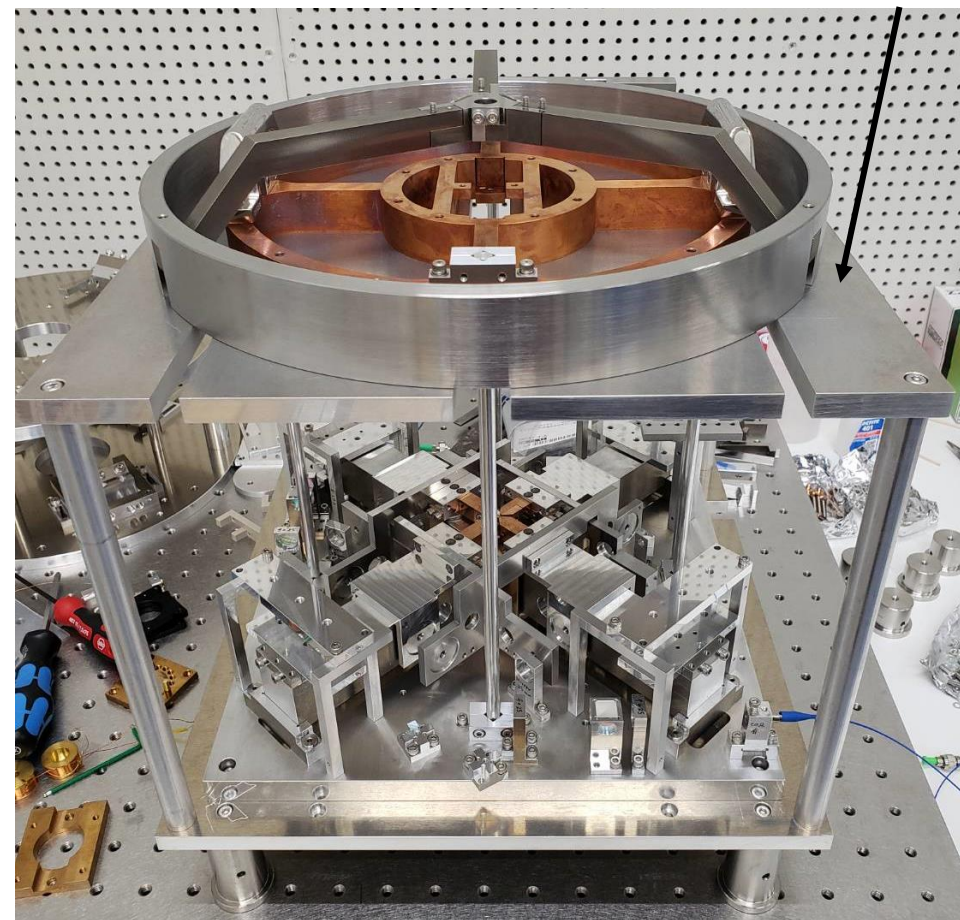


- テストマス間で共振器を構築  
← 光学ベンチの揺れが雑音とならない
- PDH信号の差から回転を読み取る
- テストマス・レーザー周波数でアクチュエート

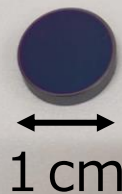
# 懸架系製作の現状

- 懸架系の仮組み・設計ミス of 修正が完了した
- 第2段階で使用するシリコン製のミラーとテストマスが納品された

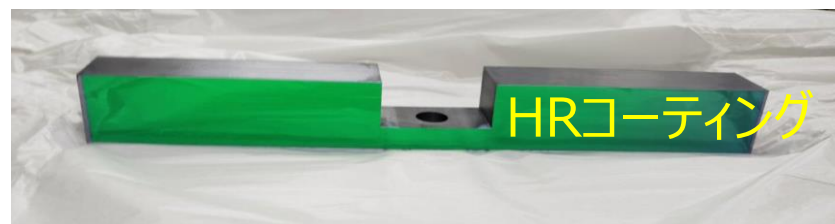
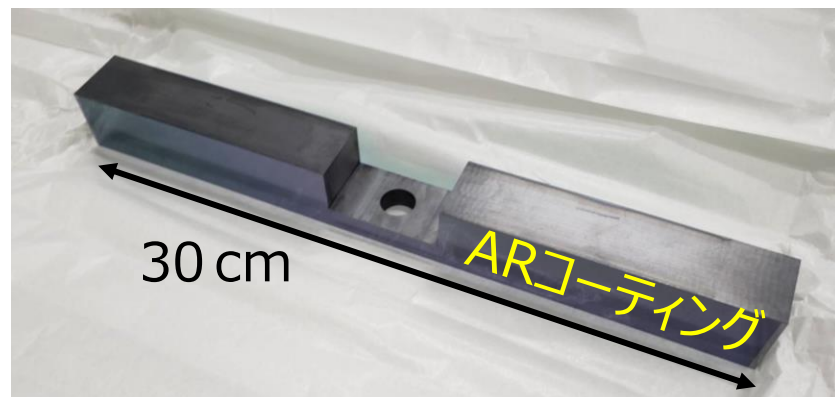
懸架ジグ



ARコーティング

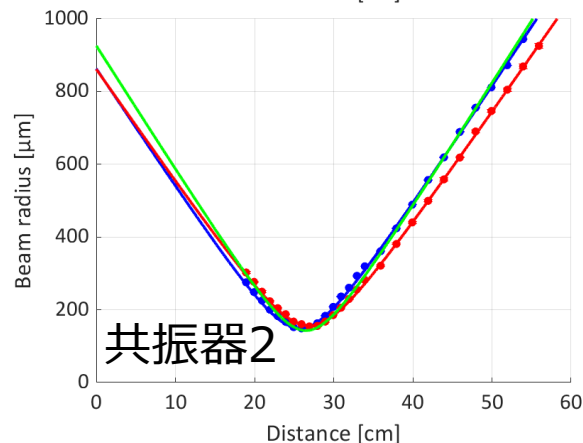
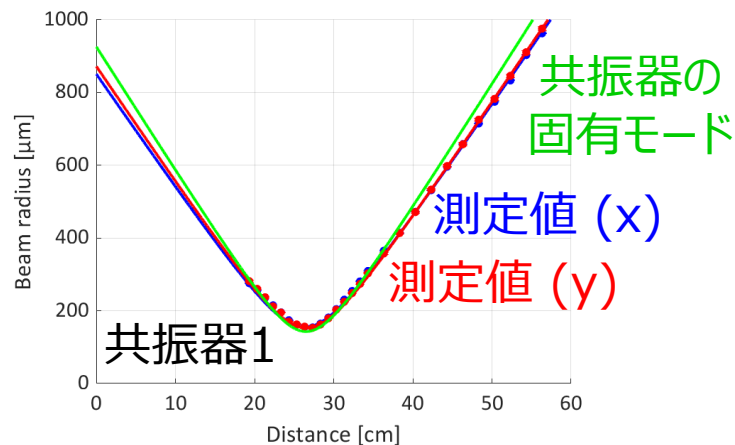
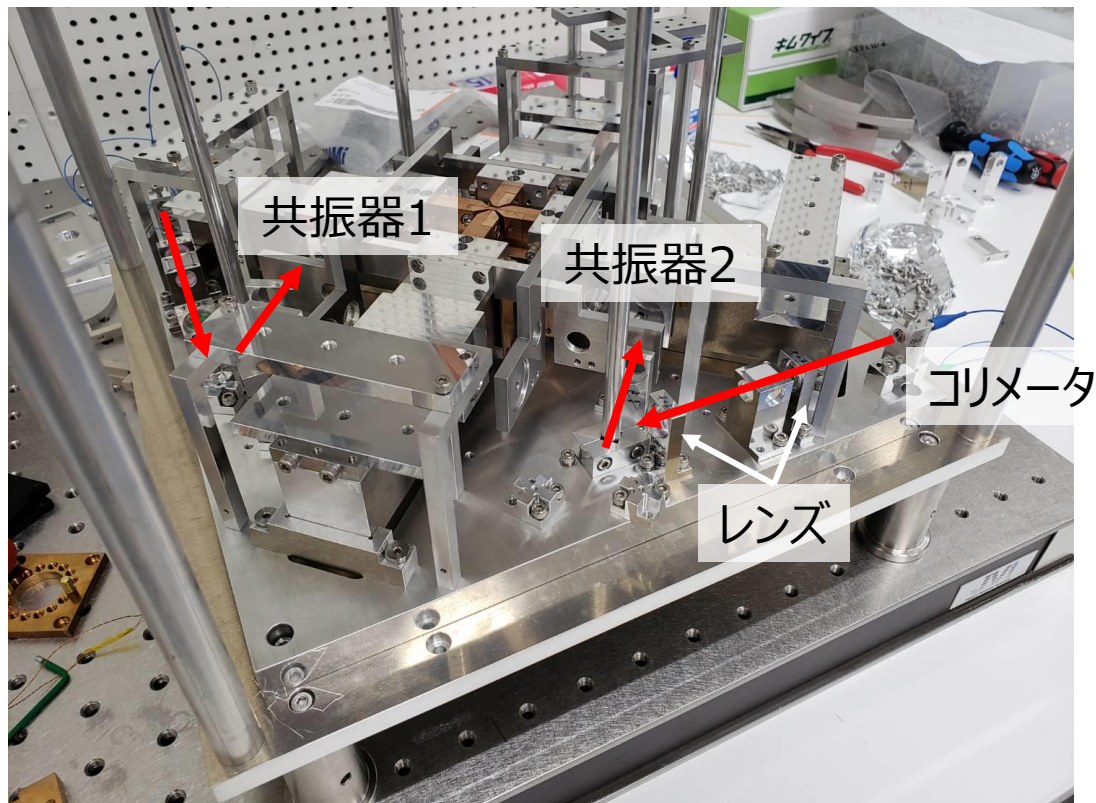


HRコーティング,  
曲率100 mm



# 光学系製作の現状

- 光学ベンチへの光学素子の配置が進行中
- 共振器への入射光のビーム径測定が完了
  - 共振器1: モードマッチ率99.4%
  - 共振器2: モードマッチ率99.0% と推定された
  - 共振器製作後に性能評価する



# まとめ・今後の予定

- ねじれ振り子型重力波望遠鏡 TOBA で 0.1 Hz 帯の重力波観測を目指している
- プロトタイプ検出器 Phase-III TOBA を開発中
- 懸架系・読み取り光学系の製作を進めている
  - 目標感度:  $6 \times 10^{-12} / \sqrt{\text{Hz}}$  (懸架ワイヤの熱雑音で制限)
  - 差動ファブリペロー共振器での角度読み取り
  - アルミニウム製のテストマスで設計の問題点の洗い出しと共振器ロックの実証を行う
  - シリコン製のテストマスを用いて低温で目標感度の実現を行う

